

山形大学紀要（工学） 第11巻 第1号 昭和45年1月
Bull. of Yamagata univ. Eng., Vol. 11 No. 1 Jan. 1970

大気中伝搬時のレーザビーム(6328\AA)シンチレーション

太田 紘一・横戸 健一

工学部 電子工学科

1. まえがき

レーザの工学的応用の一つとして、光通信は早くから重視され、既存のターブレンス理論に基づく光通信系の設計^{(1), (2)}に関する研究や、基礎的な実験研究^{(3), (4)}が活発に行なわれつつある。

しかし、実用に際してはターブレンスモデルの検討を始め、降雨、降雪の光波に対する諸影響を長期にわたり仔細に実測し最適な通信系を設計することが必要である。

また、このような研究は光波により大気微気象の様相を解明することにもなりすこぶ重要であると考えられる。

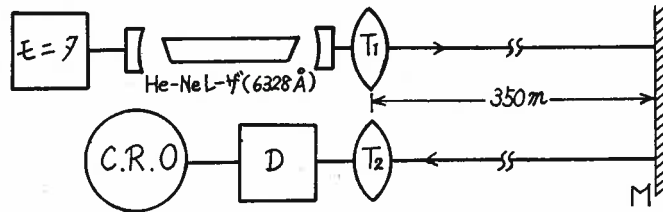
上記の観点より、地上に近い水平スパンにおいて大気中伝搬実験を実施し、 $160m$ スパン（地上高約 $10m$ ）で得られた諸結果、および、 $700m$ スパン（地上高約 $15m$ ）での結果の一部は既に発表^{(5)~(7)}したが、後者に関し、さらに、強度ゆらぎや降雨、降雪時の減衰などについて、通信系設計や、大気微気象解明のためにもすこぶ重要な結果、すなわち、降雪時の強度ゆらぎの偏差値、屈折率の構造定数、降雨量、降雪量に対する減衰係数の値が得られたので報告する。さらに、各節に、得られた結果を用い、通信への応用例も付け加え、レーザ通信の可能性を検討している。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は図1に示す通りで、送受光系を校舎屋上に平面反射鏡（直径： $100mm$ ）を約 $350m$ 離れた鉄筋建物屋上（学生寮）に設置し、折り返し約 $700m$ （地上高約 $15m$ ）の水平スパンを構成している。

コヒーレント光源として $He-Ne$ ガスレーザ（ 6328\AA ）を用い、逆望遠鏡（直径： $50mm\phi$ 、焦点距離： $200mm$ ）により平行光束とし送り出している。受光系は集光レンズ（直径： $100mm\phi$ 、焦点距離： $1000mm$ ）、および、光電管 $PV11$ よりなり全反射光束を受光する。つぎに、光電管の検出信号をシンクロスコープに導びき、写真撮影後、読み取り、電子計算機（*Tosbac* 3400）による統計処理をほどこしている。

実験は迷光、建物の機械的振動などを防ぐため、すべて夜間行なった。なお気温、風速などの気象パラメーターは送受光側、および、反射鏡側で測定している。



T_1 : コリメータ (直径: $5\text{mm}\phi$, f : 200mm)

T_2 : 集光レンズ (直径: $100\text{mm}\phi$, f : $1,000\text{mm}$)

M : 平面反射鏡 (直径: $100\text{mm}\phi$)

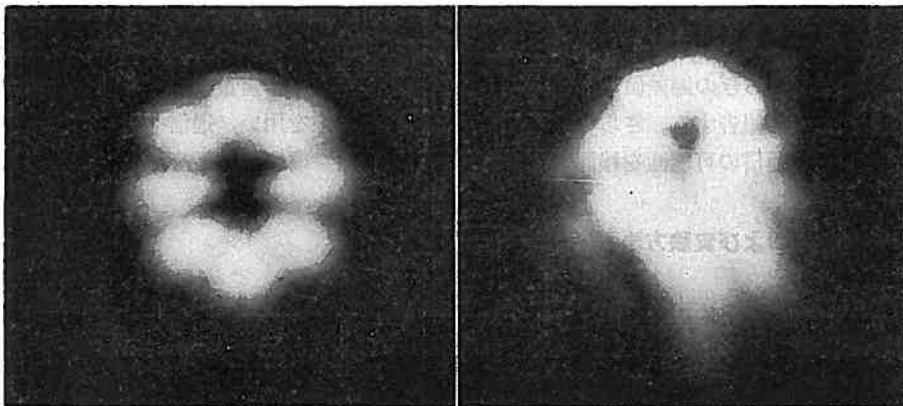
D : 光電管, C. R. O : シンクロスコープ

図1 実験装置ブロックダイアグラム

3. 実験結果と考察

図2は光ビームに対する大気の影響を明示する一例で、伝搬前後のスポットパターンを示したものである。この図からも、光ビームに対する大気の種々の影響がうかがえる。また、反射鏡を用い折り返しの伝搬路を用い実験を行なっているが、折り返しのない場合との比較はわれわれの実験では行なわれなかった。しかし、*M. Subramanian* ら⁽⁸⁾の実験によって、折り返し伝搬路でも、同じ長さの一方方向伝搬路でも、ビームへの大気の影響は全く同じになることが示されている。

以下に解析の結果を項別に掲げ考察を加える。



(a) 送信側

(b) 受光側

図2 大気の影響によるスポットパターンの変化

3.1 強度ゆらぎ

レーザ強度は、大気中の屈折率の変化（ターブレンス）、塵、微粒子、分子、雨滴、雪片などに敏感に影響され、ゆらぎを生じる。

強度ゆらぎは、通信の場合、雑音の原因となるため、あらかじめ、その大きさを知り、

通信系の設計をする必要がある。後にも示すが、とくに AM 変調時の変調度との関係が深い。

さらに、大気微気象学的見地から、大気の屈折率のゆらぎは、気温、気圧、湿度の関数で、式(1)の関係があると考えられている⁽⁹⁾。

$$\Delta n = A \left(\frac{\bar{P}}{\bar{T}} \right) \left[\frac{\Delta P}{\bar{P}} - \frac{\Delta T}{\bar{T}} - \left(\frac{B e_s \bar{f}}{100 A \bar{P}} \right) \left(\frac{\Delta f}{\bar{f}} - \frac{\Delta T}{\bar{T}} \right) \right] \quad (1)$$

ただし、 Δn ：屈折率ゆらぎ、 \bar{T} ：平均気温（°K）、 ΔT ：気温ゆらぎ、 \bar{P} ：平均気圧（mb）、 ΔP ：気圧ゆらぎ、 e_s ：飽和蒸気圧、 f ：相対湿度、 Δf ：相対湿度ゆらぎ、 $\lambda = 6328\text{\AA}$ に対し、 $A = 79 \times 10^{-6} \text{ (Kmb}^{-1}\text{)}$ 、 $B = 11 \times 10^{-6} \text{ (Kmb}^{-1}\text{)}$ 。

式(1)は実験式であり、定数 A 、 B は波長によって異なる。われわれの実験結果は式(1)との定性的な比較においても興味がある。

強度ゆらぎは全くランダムに生じるため、統計的な処理をほどこさなければならない。したがって、平均値、標準偏差値、相関などを求める必要がある。

強度ゆらぎの規格化標準偏差値 σ_I は、

$$\sigma_I = \sqrt{(I - \bar{I})^2 / (\bar{I})^2} = \sqrt{\Delta I^2 / (\bar{I})^2} \quad (2)$$

である。ただし、 I ：レーザー強度の瞬時値、 \bar{I} ：平均強度、 ΔI ：強度ゆらぎ、 $—$ ：時間平均を意味する。図 3(a)～(c) は σ_I と気温の関係を気象別に示したものである。これによると、晴天時、曇天時には、気温が高くなるにしたがい、強度ゆらぎは小さくなることが分る。強度ゆらぎと屈折率ゆらぎの具体的な関係は非常に粗い近似を用いるとほぼ比例するといえる⁽¹⁰⁾ が、詳細には分っていない。定性的に考え、屈折率ゆらぎが大きくなれば、強度ゆらぎも大きくなることは容易に理解される。したがって、式(1)から、平均気温が高くなっても ΔT はほぼ一定と考えられるので屈折率ゆらぎは小さくなり強度ゆらぎも小さくなることが理解できる。しかし、雨天時、降雪時は、雨滴、雪片の影響が非常に大きく、当然式(1)は成立しない。このことは、図 3(c) の雨天、降雪時のグラフからいえる。なお、降雪時のデータが少ないのは、1968年の冬期は暖冬異変で雪の日が少なかったためである。

図 4(a)、(b) は σ_I と相対湿度との関係を、晴天、曇天時に対しプロットしたものである。式(1)によると、相対湿度が大きくなると、ゆらぎも大きくなるが、図 4 からはその傾向は見い出せない。これは、湿度の影響が小さいことと、実験日がすべて、70%以上の高湿度であったためであろう。今後は低湿度での資料を増し検討を進める。

図 5(a)～(c) は σ_I と風速との関係を気象別に示したものである。晴天、曇天、雨天のいずれに対しても風速が増すにしたがい、強度ゆらぎは大きくなる傾向がある。このことは式(1)からは分らないが、風速が増すにつれ、屈折率の異なる媒質の、ビーム中を横切る回数が増し、強度ゆらぎも大きくなるためと考えられる。なお、降雪時の資料は暖冬異変のため、数が少なく論ずることはできない。

表 I に気象別に平均した σ_I と、以下の節に述べる相関時間 τ_0 、屈折率の構造定数 C_n をまとめて示す。表 I の結果によると、強度ゆらぎは、降雪、降雨、晴天、曇天の順に小

図3(a) 晴 天・時

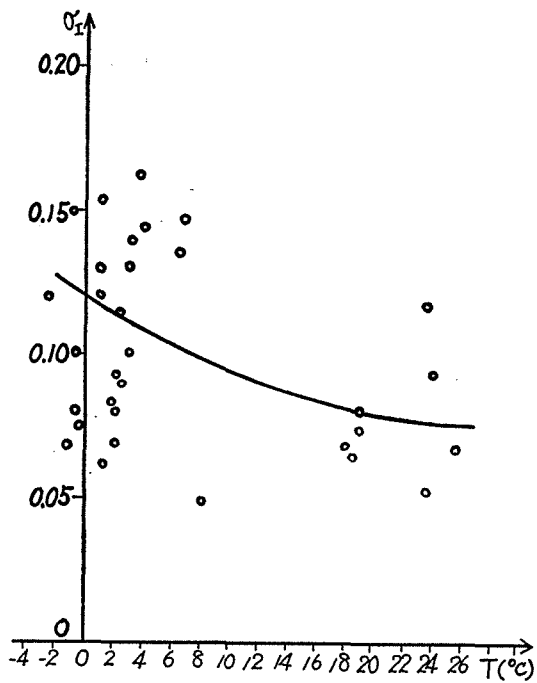
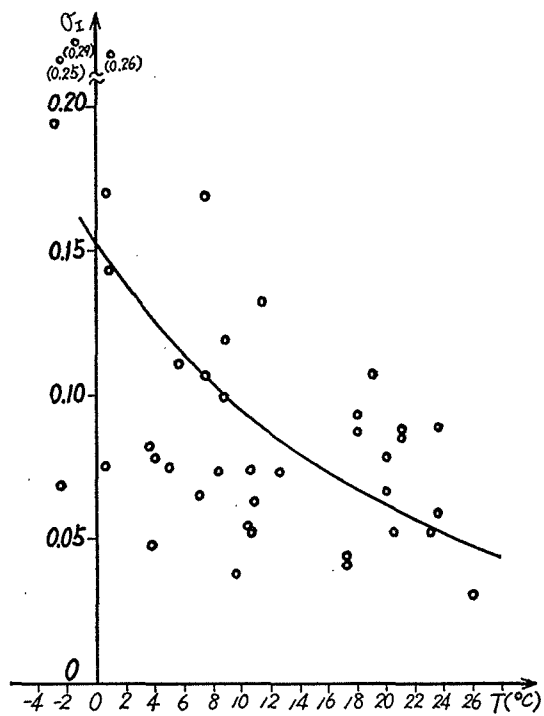


図3(b) 曇 天・時



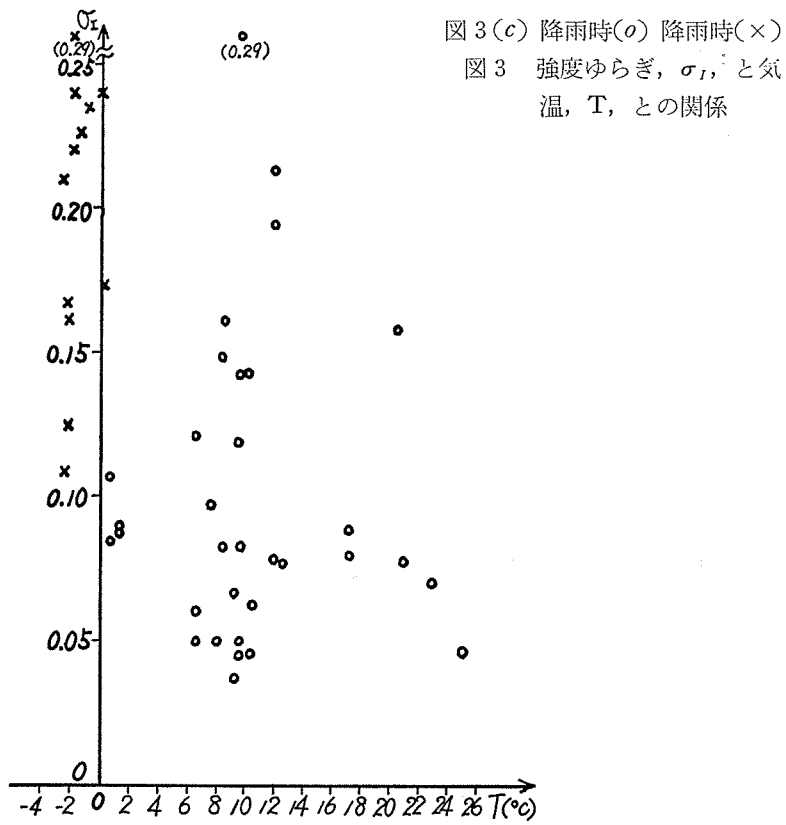


表 I 各気象時の強度ゆらぎ, σ_I , 相関時間 τ_0 , 構造定数, C_n の平均値

	晴 天 時	曇 天 時	降 雨 時	降 雪 時
σ_I	0.100	0.096	0.101	0.189
τ_0 (m sec)	16.1	13.5	9.8	7.5
$C_n (\times 10^{-8} m^{-\frac{1}{3}})$	2.10	2.18	2.26	4.48

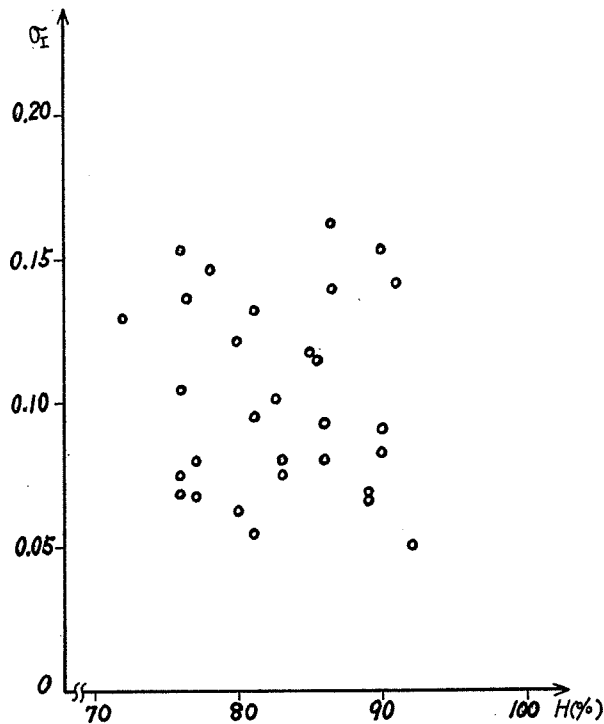


図4.(a) 晴天時

さくなり、160m 伝搬時と全く同じ順になっている⁽⁷⁾。

強度ゆらぎを用いる一例とし、レーザ光を AM 変調する場合の変調度の決定法を述べる。

AM 変調されたレーザ光の振幅 A は、

$$A = A_0 \{ 1 + m \cos (\omega t + \phi) \} e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \quad (3)$$

となる。ただし、 ω ：変調角周波数、 ω_0 ：搬送波角周波数、 m ：変調度 ($0 < m \leq 1$)、 ϕ 、 ϕ_0 ： $t=0$ での位相。

いま、簡単化のため $\phi = \phi_0 = 0$ とする。

受光されるレーザ強度 I は、

$$I \propto AA^* = A_0^2 (1 + m \cos \omega t)^2 \quad (4)$$

となり、平均強度 \bar{I} は、

$$\bar{I} = A_0^2 \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) \quad (5)$$

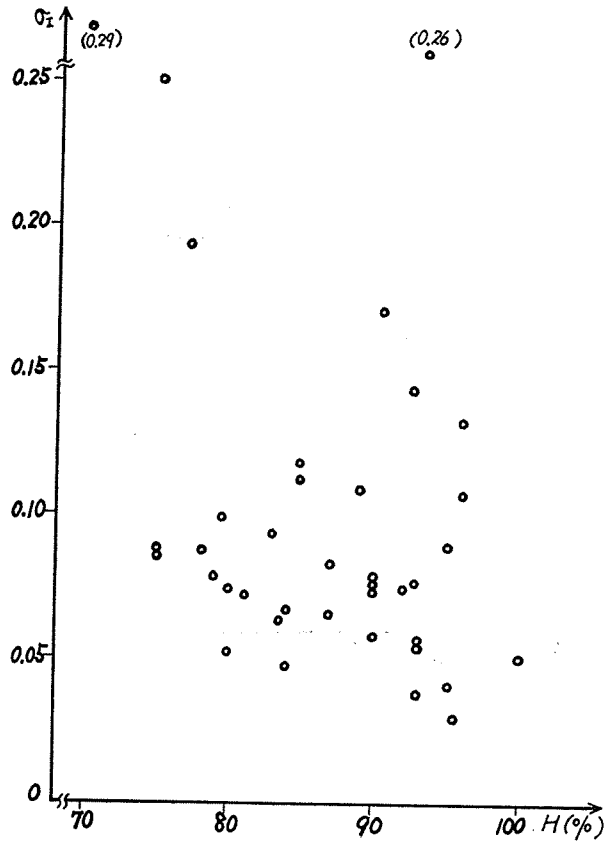


図4(b) 曇天時 強度ゆらぎ, σ_I , と相対湿度, H , の関係

偏差は,

$$\sqrt{\Delta \bar{I}^2} = \sqrt{2} A_0^2 m \quad (6)$$

となる。偏差を平均強度で規格化すれば,

$$\sigma_{Is} = \frac{\sqrt{\Delta \bar{I}^2}}{\bar{I}} = \frac{2\sqrt{2} m}{m^2 + 2} \quad (7)$$

となり, S/N 比は,

$$S/N = \frac{\sigma_{Is}}{\sigma_I} = \frac{1}{\sigma_I} \frac{2\sqrt{2} m}{m^2 + 2} \quad (8)$$

となる。 $S/N \geq 1$ とするためには, 式(8)より,

$$\sqrt{2} \frac{1}{\sigma_I} (1 - \sqrt{1 - \sigma_I^2}) \leq m \leq \sqrt{2} \frac{1}{\sigma_I} (1 + \sqrt{1 - \sigma_I^2}) \quad (9)$$

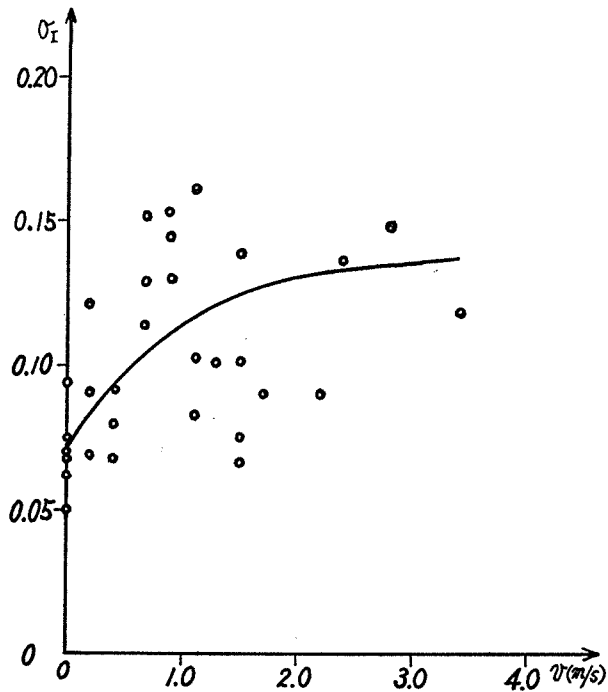


図 5(a) 晴 天 時

となる。ここで、 $\sigma_I^2 \ll 1$ 、 $0 < m \leq 1$ を用いると、式(9)は

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_I \lesssim m \leq 1 \quad (10)$$

となる。したがって、強度ゆらぎの最も大きい降雪時は、表 I より $\sigma_I \sim 0.2$ だから、式(10)より、変調度の範囲は

$$0.14 \lesssim m \leq 1 \quad (11)$$

となり、 m をこの範囲に設定すれば通信は可能である。しかし、 $m=1$ としても式(8)より、 S/N 比を $2\sqrt{2}/3\sigma_I$ 以上改善することはできない。

3.2 強度ゆらぎの時間相関

前節でも述べたように、強度ゆらぎを統計的に扱う一手段として相関関数を求める。

相関関数はパワースペクトルとフーリエ変換の関係にあるので⁽⁷⁾、強度ゆらぎの相関関数を求めれば、強度ゆらぎのパワースペクトルが分る。これは、雑音のスペクトルを知ることになり、変調周波数を決めることができる。筆者らの研究によると⁽¹¹⁾、強度ゆらぎの時間相関関数と屈折率ゆらぎの時間相関関数は等しくなることが分っている。このことから、強度ゆらぎの相関関数から屈折率ゆらぎの相関関数が求められ、タープレンスの様相を知ることができる。

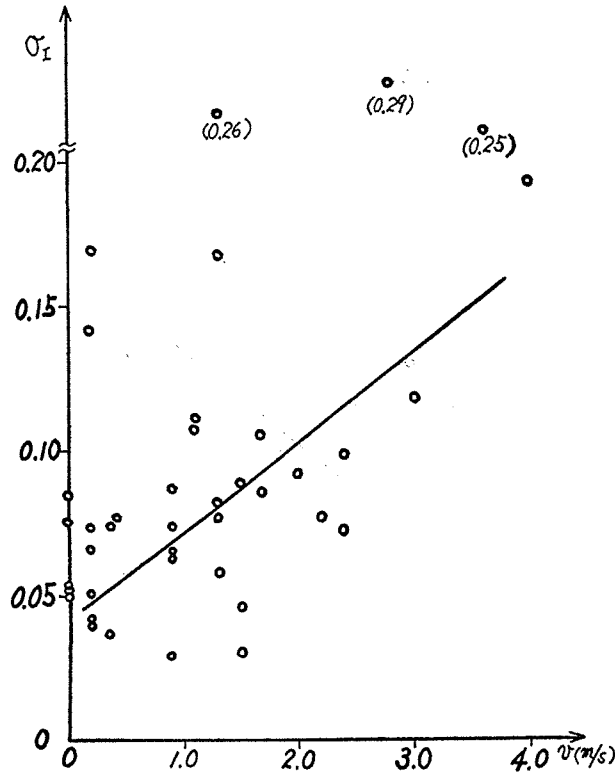


図 5(b) 曇 天 時

強度ゆらぎの相関関数 $B_I(\tau)$ は文献(7)の式(2)より,

$$B_I(\tau) = \overline{\{I(t) - \bar{I}(t)\}\{I(t+\tau) - \bar{I}(t)\}} \quad (12)$$

となる。ただし, t : 時間, τ : 時間間隔。さらに, 規格化すると, 文献(7)の式(3)より,

$$R_I(\tau) = \frac{B_I(\tau)}{B_I(0)} \quad (13)$$

となる。

ビーム強度の時間的変化の実測値より, 1 m sec 毎の読み取り値を用いて, 式(13)の $R_I(\tau)$ を種々の τ について求め, $R_I(\tau)$, すなわち, R_I 対 τ のグラフを描き, $R_I(\tau) = 1/e$ で定義される相関時間 τ を読み取る。ただし, $e = 2.7183$ 。

表 I の τ_0 はこのようにしてもとめられた気象別の平均値である。これより, ゆらぎの大きさは晴天, 曇天, 降雨, 降雪の順に大きくなる。また, 上にも述べたように, パワースペクトルとフーリエ変換の関係にあるため, $1/\tau_0$ がほぼ, 雑音周波数の最大値を決める。したがって, 降雨時には, 表 I から, $\tau_0 \sim 10$ m sec であり, このときの最大雑音周波数は ~ 100 Hz となる。このことから, 変調周波数を 100 Hz 以上に選べば通信は十分可能であるといえる。

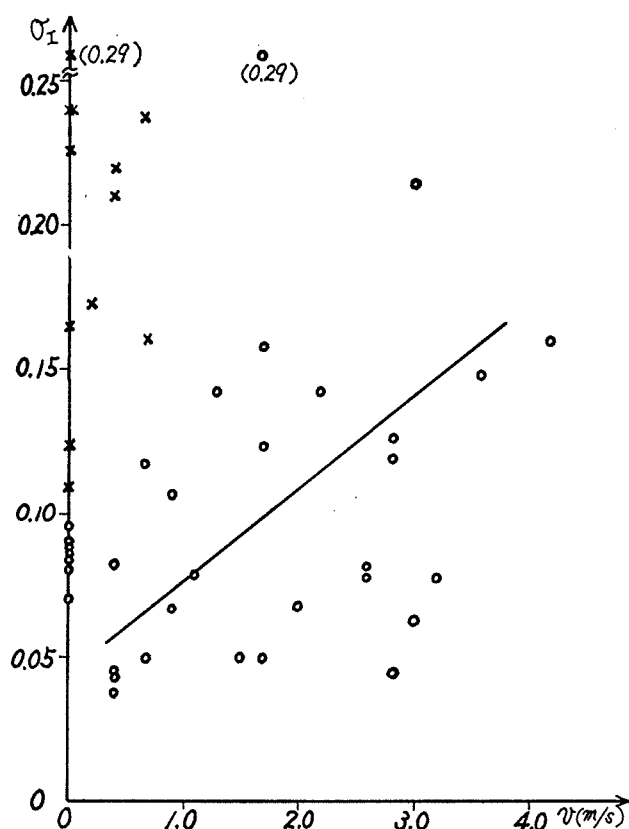


図5(c)降雨時(○)降雪時(×) 強度ゆらぎ, σ_I , と風速, v , との関係

相関時間 τ_0 と相関距離 l_0 , ビームに対する垂直風速 v_n との間には *Tatarski*⁽¹²⁾により,

$$l_0 = v_n \tau_0 \quad (14)$$

の関係がある。図6(a)~(c)は各気象時の τ_0 と風速との関係をプロットしたものであるが、風速が増すにつれ、相関時間は短くなる傾向がみられる。このことは式(14)から l_0 を一定と考えれば、垂直風速が増すにつれ、 τ_0 は双曲線的に短くなることから理解できる。

図6から、晴天時の l_0 は $\sim 2\text{ cm}$, 曇天時は $\sim 1.5\text{ cm}$, 雨天時 $\sim 1\text{ cm}$ とすると、ほぼ式(14)にしたがう。しかし、正確に式(14)に従わない原因としては、 l_0 が気温、気圧の影響を受け、一定でないこと、また、図6の横軸は垂直風速ではなく、任意方向の風速であることなどが考えられる。

3.3 屈折率の構造定数

タープレンスの理論上重要な屈折率の構造定数を求める。これより、屈折率ゆらぎの大

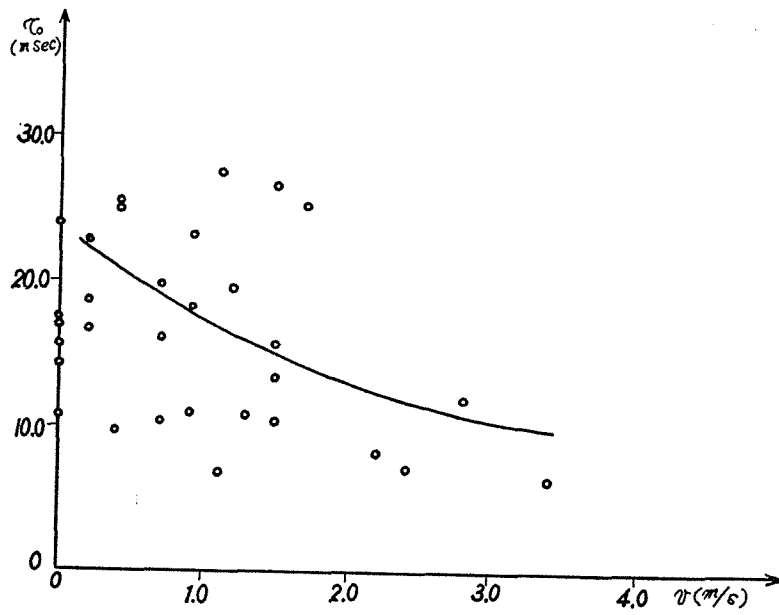


図 6(a) 晴 天 時

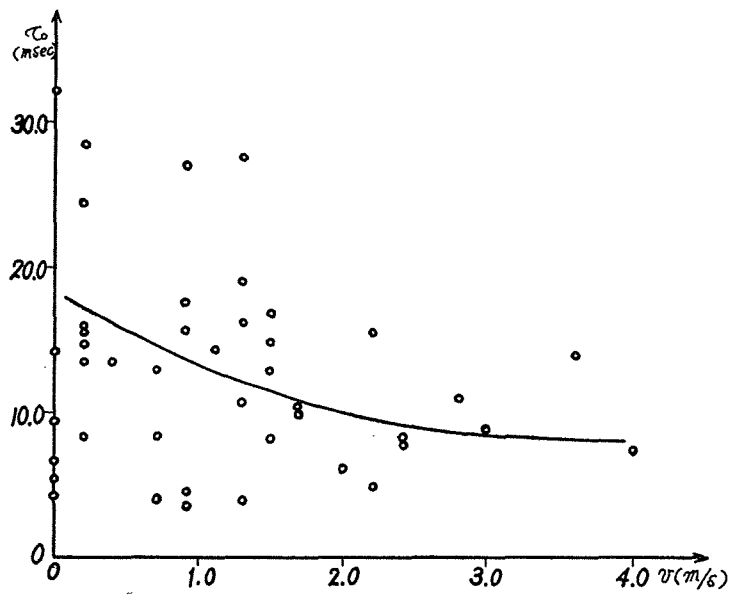


図 6(b) 曇 天 時

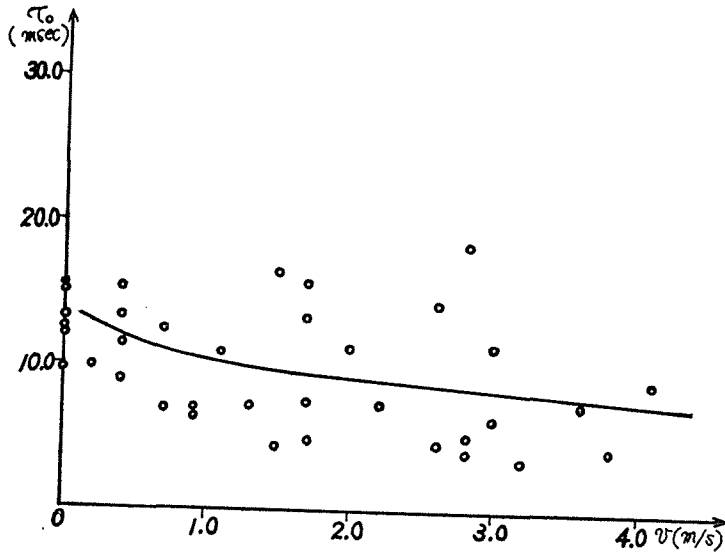


図 6(c) 降雨時 相対時間, τ_0 , と風速, V , との関係

きが判定でき、通信系の設計時には必ず必要となる定数である。

屈折率の構造定数 C_n と対数強度ゆらぎ $\rho_I^2 = \overline{(\log I/\bar{I})^2}$ との間には, *Tatarski*⁽¹²⁾ によりつぎの関係が求められている。

$$\rho_I^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\sqrt{L\lambda} \geq l_0) \quad (15)$$

ただし, l_0 : タープレンスの内部スケール, $k=2\pi/\lambda$, L : 伝搬距離, λ : 波長

式(15)に, $\lambda=6328\text{\AA}$, $L=700\text{m}$ を代入し, C_n の値を求め, 気象別に平均し, 表 I に示す。表 I より, 晴天, 曇天, 降雨, 降雪の順に C_n は大きくなり, 相関時間のこれらに対する傾向と同一である。ただし, 降雨, 降雪時の C_n は雨滴, 雪片の影響をタープレンスを等価視して求めたものである。これらの値は *Davis*⁽¹¹⁾ の分け方によると, 弱いタープレンスから中程度のタープレンスの領域に入り, 通信の可能性は十分あるといえる。

さらに, 式(15)から ρ_I^2 と σ_I^2 の関係が次式のように求まる。

$$\rho_I^2 = \overline{\left(\log \frac{I}{\bar{I}} \right)^2} = \overline{\left(\log \left(1 + \frac{\Delta I}{\bar{I}} \right) \right)^2} \approx \overline{\left(\frac{\Delta I}{\bar{I}} \right)^2} = \sigma_I^2 \quad \left(\left| \frac{\Delta I}{\bar{I}} \right| \ll 1 \right) \quad (16)$$

このことから, $\rho_I^2 \approx \sigma_I^2$ となり, 強度ゆらぎの伝搬距離依存性も $\sim L^{11/6}$ であることがわかる。

3.4 減 衰

大気中の微粒子, 分子による吸収, 散乱, 雨滴, 雪片による散乱などで, レーザ強度の

減衰がどの程度かを知ることは重要な問題である。

ここでは、送受光学系による減衰が無視できる程度大きい降雨時、降雪時の減衰について述べる。

降雨量、降雪量が dQ だけ増加すれば、ビーム強度 I は dI だけ減少する。したがって、

$$dI = -\alpha I dQ, \quad \alpha: \text{比例係数 (減衰係数)} \quad (17)$$

これを解けば、

$$I = I_0 e^{-\alpha Q} \quad (18)$$

となる。ただし、 $I_0: Q=0$ のときの強度、 Q : 降雨量、または降雪量 (mm)。

図 7(a), (b) は横軸に Q (mm), 縦軸に \bar{I}/I_M (ただし、 I_M : モニタ強度) を目盛ったものである。これより、10分間の降雨量に対する減衰係数 α_{rain} は $\sim 0.06 [mm^{-1}]$, 降雪量に対しては、 $\alpha_{snow} \sim 0.5 [mm^{-1}]$ と求まる。

文献(14)によると、雪片 1 個当りの平均減衰係数は 0.1~1.5 で、上で求めた値もこの範囲に入る。さらに雪質によっても減衰係数は異なり、上で求めた値は、文献(15)によると乾質の雪に相当する。なお、伝搬距離と減衰との関係について今後研究を進める予定である。

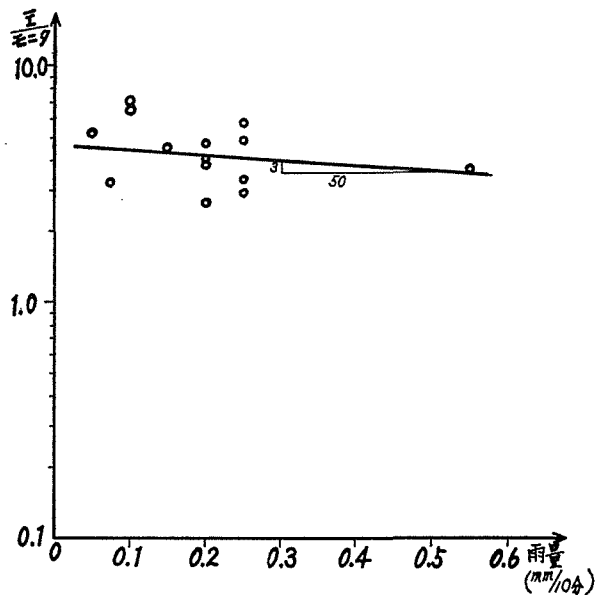


図 7(a) 降雨量対減衰

4. むすび

四季を通じ、種類の気象条件の下で実施した、700m スパンレーザビーム伝搬実験の結

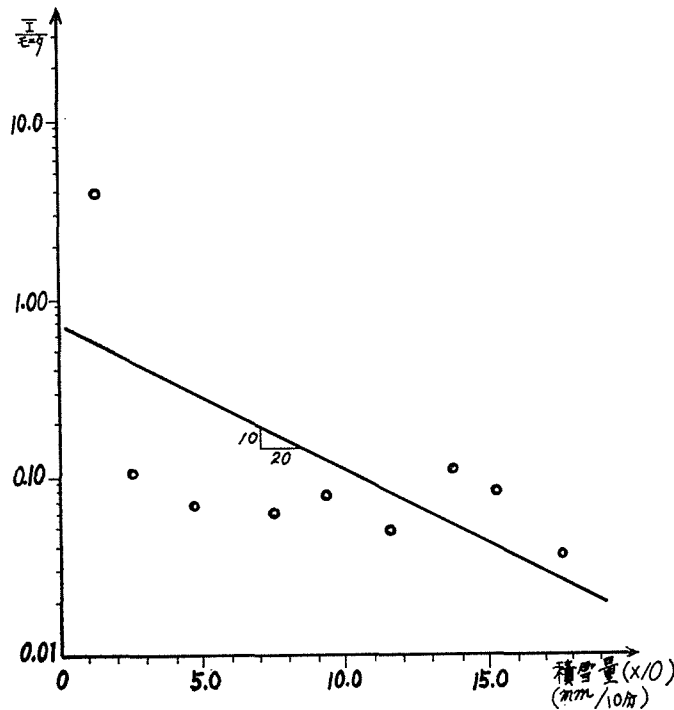


図7 雨，雪によるビーム減衰

果から得られる結論を要約すると，

(1) 強度ゆらぎは $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 程度で，曇天時に最も小さく，気象条件との対応は，気温が低いほど，また風速が大きいくほどゆらぎは大きくなり，実験式の傾向と同じになる。また，光通信系で良好な信号を得るには AM 変調の場合，変調度は15%以上に選べば，降雪時でも通信が可能であることが分った。なお，任意のスパン長 L に対しては $\sigma_I^2 \sim L^{11/6}$ の関係がある。

(2) 強度ゆらぎの相関時間 τ_0 はビーム強度がほぼ一定に保たれる時間と見なせるので， τ_0 が小さいほど大気によるビームの振幅変調周波数は高くなる。降雨時には $\tau_0 \sim 10 \text{ msec}$ だから雑音周波数はほぼ 100 Hz 程度で，実用上の問題はない。また，風速が増すにつれ， τ_0 は小さくなり，相関距離を $\sim 1 \text{ cm}$ とすると理論式とほぼ一致する。

(3) 構造定数の値は $\sim 10^{-8} (\text{m}^{-1/3})$ 程度で，弱ターゲレンスから中程度のタープレンスである。

(4) 降雨，降雪量とビーム強度の関係は指数関数で表わされることを示し，それぞれの減衰係数は， $\alpha_{\text{rain}} \sim 0.06 [\text{mm}^{-1}]$ ， $\alpha_{\text{snow}} \sim 0.5 [\text{mm}^{-1}]$ （ただし，10分間の降雨，積雪量に対して）であることを求め，雪質は乾質であるとする，他の実験結果とも一致する。

以上，これまでに得られた結果を提示したが，これら諸結果は，通信系の設計の際に必須の基礎資料となるであろうし，また，大気微気象解明にもすこぶる有益なものと考える。

今後は、さらにヘテロダイン検出方式で重要な空間相関，偏光面ゆらぎの測定やパルス伝搬実験を行なう予定である。

終りに，データのプログラミングに協力いただいた本学津川昭良講師，実験に協力された中川肇氏（現在，一迫中学校教員），ならびに卒研学生，阿部，鴨原，高橋，附田らの諸君に深謝申し上げる。

文 献

- (1) 例えば，J. I. Davis : “Consideration of atmospheric turbulence in laser system design”, Appl. Opt., **5**, 1, P.139 (1966)
- (2) 例えば，H. Hodara : “Laser wave propagation through the atmosphere”, **54**, 3, p.369 (1966)。
- (3) 例えば，D. H. Höhn : “Effects of atmospheric at 6328 Å I, II”, Appl. Opt., **5**, 9, p.1427 (1966)。
- (4) 例えば，T. S. Chu and D. C. Hogg : “Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5, and 10.6 microns”, Bell Syst. tech. J., **47**, 5, p.723 (1968)
- (5) 横戸，太田，吉田，津川：“種々の気象条件下におけるレーザー光の伝搬”，信学会アンテナ・伝搬研資（昭42—09）
- (6) 横戸，太田，中川：“レーザー光の大気中伝搬”，信学会量子エレクトロニクス研資（昭44—11）
- (7) 横戸，太田：“レーザービーム（6328Å）大気中伝送時の各種ゆらぎ”，信学論（B），**52**—B, 7, p.390（昭44—07）
- (8) M. Subramanian and J. A. Collinson : “Modulation of laser beams by atmospheric turbulence—depth of modulation”, Bell Syst. tech. J., **46**, 3, p.622 (1967)
- (9) D. D. Erway, et al. : “Study of Atmospheric degradation of laser beams”, EOS Report 7097-Final, 12. (1967)
- (10) 太田：“レーザー光の大気中伝搬に関する研究”，修士学位論文（昭43—2）
- (11) 太田，吉田，高橋，津川，横戸：“He-Neレーザーによる大気の伝送特性(IV)，（強度の相関）”，昭43電四連大，1383（昭43—3）
- (12) V. I. Tatarski : “Wave propagafion in a turbulent medium”, p.285, McGraw Hill Co. Inc. New-York (1961)
- (13) D. L. Fried : “Optical heterodyne detection of an atmospherically distorted signal wave front”. Proc. IEEE, **55**, 1, p.57 (1967)
- (14) 鈴木，榊原，児玉，金谷：“光波伝播と降雪現象(1)”，信学会アンテナ・伝搬研資（昭42—09）
- (15) 拝原，青木，牛坂，西辻，松本：“大気中に於けるレーザー光伝搬(1)”，和44信学全大，548（昭44—9）

Scintillation of Laser Beam (6328\AA) propagated through the Atmosphere

Kōichi ŌTA and Ken-ichi YOKOTO

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering

This paper reports the scintillation characteristics of a laser beam (6328\AA) propagated through the atmosphere under various meteorological conditions. All the experiments were made after sunset over a 700m (350m folded) horizontal path (about 15m high above the ground).

Obtained results, such as normalized standard deviations and correlation times of the beam intensity and structure constants of the atmospheric turbulence, are graphically shown with each meteorological parameters and their mean values are tabulated. Furthermore, the attenuation constant to 10min. rainfall or snowfall was determined by the measurements of beam attenuations in rain or snow.

These results may be useful for micro-meteorological analysis of the atmosphere as well as for optical communication practice.